

Maniobras especiales de carga y transporte de elementos prefabricados en España para el nuevo puente de Champlain en Montreal (Canadá)

Outstanding transportation and loading maneuvers of the elements fabricated in Spain for the New Champlain Bridge. In Montreal (Canada)

Manuel Escamilla García-Galán^a, Luis Miguel Salazar Martín^{*, b}, José Antonio Agudelo Zapata^c, Ainhoa Marín Camero^d, Alejandro David Salazar Martín^e, José Alfredo Castro López^f

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pontem Engineering Services, S.L. CEO. mescamilla@pontem.es

^{*, b} Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pontem Engineering Services, S.L. Director Técnico de Construcción.

lmsalazar@pontem.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pontem Engineering Services, S.L. Director Técnico de Proyectos. agudelo@pontem.es

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pontem Engineering Services, S.L. Asistente de Dirección y QA. amarin@pontem.es

^e Ingeniero Civil. Pontem Engineering Services, S.L. Ingeniero de Proyecto. asalazar@pontem.es

^f Ingeniero Civil. Pontem Engineering Services, S.L. Ingeniero de Tratamiento Superficial. jacastro@pontem.es

RESUMEN

El tablero metálico de la parte atirantada y los cabeceros y arranques de pilas del Nuevo Puente Champlain sobre el río San Lorenzo han sido fabricados en España y transportados a Canadá mediante barco. Para permitir la carga, transporte a puerto y carga en barco, ha sido necesario desarrollar un amplio espectro de soluciones debido a la variabilidad de elementos fabricados. Además, se han realizado comprobaciones tensodeformacionales en los elementos, para verificar la viabilidad tanto en el transporte terrestre, carga en barco, como el tránsito en el Atlántico Norte.

ABSTRACT

The steel deck of the cable stayed bridge and the pier caps and butts of the New Champlain Bridge have been fabricated in Spain and transported to Canada by ship. A wide range of solutions have been designed to allow the loading, transportation to yard and loading into ship, due to the variability of the elements fabricated. Furthermore, stress and deformation verifications have been carried out on the permanent works to ensure the validity during road transportation, ship loading and taxi in the North Atlantic.

PALABRAS CLAVE: Construcción acelerada, maniobras especiales, izado, barco, heavy-lifting.

KEYWORDS: Accelerated bridge construction, outstanding maneuvers, ship, heavy-lifting.

1. Introducción

Para ubicar al lector, se realiza una muy breve descripción del viaducto, que puede ser completada en publicaciones específicas y en la referencia [1], toda vez que no se pretende aquí

la descripción del mismo. Es un puente atirantado de 240 m de luz principal y un solo pilono, con una longitud total de 3,3 km. La sección transversal está formada por tres

cuerpos bien diferenciados, el North Bound, el Transit Corridor y el South Bound. Los tirantes se anclan al tablero gracias a las Cross Beams, que actúan a modo de costilla, uniendo los tres tableros. Todas las uniones en obra son realizadas mediante atornillado, sin soldadura.



Figura 1. Infografía del puente [1].

Por su parte, las partes superiores de las pilas (arranques y cabeceros), cuyo diseño es único, presentan un diseño con estructura metálica, para conseguir una mejora en los plazos de obra con respecto a la opción in situ. Estos cabeceros (pier caps) presentan en su parte inferior, más estrecha, el arranque (butt), que es la pieza que lo une con la parte de hormigón del fuste de la pila.



Figura 2. Pier caps sobre butts, instalación final [1].

En cuanto al pilono atirantado, la riostra es metálica, denominada Lower Cross Beam, fabricada también en España.

En un proyecto así, minimizar el tiempo de construcción es clave, por lo que la tendencia es a prefabricar los elementos del máximo tamaño posible, realizando uniones en obra. Esa es la clave de la construcción acelerada de puentes, o Accelerated Bridge Construction (ABC).



Figura 3. Lower Cross Beam [1].

El puente se ha diseñado para una vida útil de 125 años, por lo que evitar cualquier daño a la pintura era un condicionante de partida del diseño de las maniobras.



Figura 4. Vista general ejecución del tramo atirantado [1].

2. Segmentos a fabricar y transportar

Las dimensiones y pesos de los elementos fabricados en España fueron muy variadas. Las mayores piezas, que son los pier caps, rondan las 220 t, con dimensiones de 27x8x3.4 m, con forma trapecial en planta, con un hueco trapecial en su interior. Los tramos del tablero eran muy variables, de dimensiones de hasta 25.3x8x3.2 m y pesos de más de 120 t. Los butts de los pier caps presentaban forma trapecial de 8.3x3.3x3.3 m, con hasta 20 t de peso, con unas posiciones variables de las cogidas, gracias a orejetas atornilladas a la placa que los une con el pier cap, usando después tiro directo con 4 eslingas de longitud variable.

Lo relevante de las maniobras no es sólo el tamaño o peso, sino también la variabilidad de las configuraciones empleadas. En efecto, se emplearon maniobras formadas por una o dos grúas, cáncamos planos, con forma de T, vigas de cogida atornilladas, separadores de cables de varias longitudes y cargas máximas de uso, pescantes (fishplates), tiro directo con eslinga, eslingas de acero o kevlar y cadenas.

Lo anteriormente expuesto implica la necesidad de analizar dichas maniobras, mediante dos enfoques. Uno, el diseño de las maniobras y los elementos auxiliares necesarios, y dos, analizar la repercusión a nivel tensodeformacional de los diversos estados de carga en la pieza a transportar.

3. Transporte terrestre

Debido al tamaño y peso de las piezas, en buena parte de los casos fue necesario emplear transportes modulares, más conocidos como SPMT por sus siglas en inglés (Self Propelled Modular Transportation).

Se emplearon varios tipos de SPMT, según la disponibilidad y las necesidades de transporte. (Véase figura 5).



Figura 5. Transporte modular.

4. Tránsito marítimo

Durante el tránsito por el Atlántico Norte los barcos sufren aceleraciones verticales, longitudinales y transversales considerables, con inclinaciones de hasta 45°, lo que transmite a los segmentos cargas de entidad, aplicadas a través

de los elementos de trincaje (lashing), mediante cadenas, topes (stoppers), etc. Así, en función de dónde se ubican las piezas en las distintas cubiertas del barco, más o menos alejadas del centro de carena tanto en longitudinal, como en transversal y en altura, sufren mayores o menores aceleraciones, que deben ser tenidas en cuenta para las solicitaciones de los elementos de fijación durante el transporte. En la siguiente tabla puede verse un ejemplo de aceleración vertical de casi 1 vez el valor de la aceleración de la gravedad (tanto ascendentes como descendentes), transversales de hasta 6.37 m/s² y longitudinales de hasta 3.1 m/s², en ambas direcciones.

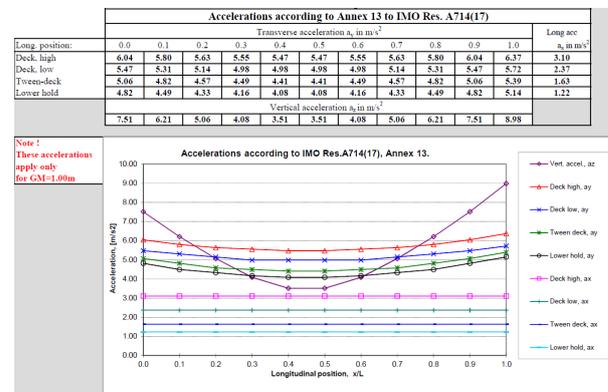


Figura 6. Aceleraciones de la carga en función de su ubicación en el barco.

Las aceleraciones son calculadas en base a la Resolución A.714(17) de la International Maritime Organization, bajo el nombre “Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing”. Además, según la “International Convention for the Safety of Life at Sea” (SOLAS), de 1974, debe indicarse de forma visible el peso total, incluyendo los grilletes y resto de elementos del arnés de izado. Además, las cargas de más de 50 t, deben llevar visible la posición del centro de gravedad de la carga en sus caras.

Los trincajes se deben diseñar de forma coordinada con el barco que realice el tránsito, para tener en cuenta el material disponible a bordo, tales como chapas a soldar al propio barco, cadenas, eslingas, maderas para hacer tope con los elementos del casco o cubiertas, etc.

Existe software específico para realizar el cálculo de los trincajes, como el que se muestra

a continuación, que era empleado por el Armador. Además, para la ocasión, se desarrolló un software propio de verificación de los planes de trincaje (lashing plans).

NAUTICUS		Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing 2003 Edition, Annex 13		LASHCON IMO		Version 9.00.0 Jan 2004		Sign: 17:37	
Input of cargo unit data		P3-PCW01N		Give cargo unit storage position		Vertical: Lower hold		?	
Cargo unit specification:		m 217.00 ton		Longitudinal: 0.4L		PS		PS	
Mass of cargo unit:		μ 0.30 (-) ?		Calculation method:		Alternative calculation		? Recommended	
Coefficient of friction:		Transv. Long		Advanced calculation		?		?	
Wind exposed area:		Aw 0.00 0.00 m ² ?							
Sea exposed area:		As 0.00 0.00 m ² ?							
Lever arm of tipping:		a 1.50 m ?							
Lever arm of stabilisers:		b 4.21 m ?							
Input of lashing data		1 2 3 4 5 6 7 8 9 10							
Max securing load [kN]:		MSL 420 420 210 210 200 200 200 200							
Transverse lashing direction		PS SB		SB PS PS SB					
Longitudinal lashing direction		Fwd Aft		Aft Fwd					
Vertical securing angle [deg]:		α 0 0 0 0 50 50 65 80							
Horizontal securing angle [deg]:		β 0 0 90 90 50 50 90 90							
Horizontal securing distance:		d [m]							
RESULTS:									
Actual forces		Securing capacity [kN / kNm]		Accelerations		Override		Reset	
Transverse sliding force [kN]: 888.9		Transv. capacity: PS [kN] 1086 OK		Transverse: a _x = 4.08 m/s ²					
Longitudinal sliding force [kN]: 268.8		Long. capacity: SB [kN] 1089 OK		Vertical: a _y = 3.51 m/s ²					
Cargo tipping moment [kNm]: 1528.9		Tipping capacity: Fwd [kN] 673 OK		Longitudinal: a _z = 1.22 m/s ²					
		Aft [kN] 673 OK							
		PS [kNm] 8962 OK							
		SB [kNm] 8962 OK							

Figura 7. Cálculo del trincaje mediante programa informático.

En base al cálculo anterior, resultaba el trincaje que se muestra a continuación como ejemplo.

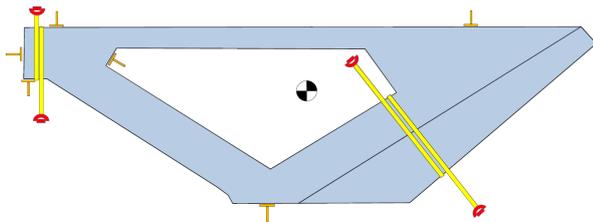


Figura 8. Planta de cabezera de pila con los elementos de trincaje representados (topes y cadenas con argollas).

Lashing & Sea- Fastening Material						
Type	MSL/each	Port	Stbd	Fore	Aft	Total
T-Plate Stopper	210kN	2	2	1	1	6
5" Strap in basket on D-Ring	120kN	2	2	-	-	4

Figura 9. Listado de elementos de aseguramiento de la carga de ese cabezera.

Además de las acciones gravitatorias propias de las aceleraciones en los 3 ejes cartesianos, hay que tener en cuenta el viento y los golpes de mar, por el impacto del oleaje, en caso de que las piezas viajen en cubierta de intemperie.



Figura 10. Topes colocados para fijación de las piezas a la cubierta del barco.



Figura 11. Colocación de cadenas y topes soldados de fijación.

El apoyo de las piezas en el barco era muy importante que fuera lo más distribuido posible, disponiendo apoyos de madera o neoprenos donde la pieza presenta rigidización.



Figura 12. Apoyos de madera que reciben una pieza del tablero.

5. Algunos factores tenidos en cuenta en las maniobras

Para el diseño de las maniobras de carga en España y que sean válidas para la descarga en Canadá, teniendo en cuenta que son tres talleres

diferentes los que fabrican, el tránsito en barco, la variabilidad de las piezas, que se usaron varios barcos diferentes, cada uno con su disponibilidad de grilletes y eslingas; fue necesario tener varios aspectos en cuenta a la hora de simplificarlas en la medida de lo posible, reduciendo riesgos, plazos, costes y dificultad en la puesta en marcha y ejecución. Algunos factores que se recomienda tener en cuenta en el diseño de maniobras son: número de grúas disponibles, carga máxima por grúa, distribución de cargas por cada grúa (cargas muy diferentes entre las dos grúas del barco complican la maniobra de lastrado, ralentizando la maniobra), dificultad en el lastrado del barco, posibilidad de controlar la inclinación de la pieza tanto en longitudinal como en transversal, altura total del arnés de izado, radios de trabajo, disponibilidad de grilletes y eslingas, diferencias en las posiciones del centro de gravedad entre el teórico y el real construido, variabilidad en geometría de los puntos de cogida a las cargas a mover, reproducibilidad de las soluciones, solicitaciones en los elementos provisionales y en los permanentes, dificultad para la instalación, riesgo para la pintura, posibilidad de agua en el interior por lluvia u oleaje (para la descarga), posibilidad de hacer taladros o soldaduras a las cargas, etc.

6. Diseño de elementos auxiliares

Los elementos metálicos fueron diseñados bajo doble normativa, el Eurocódigo 3 [4], para que las maniobras estuvieran cubiertas en su uso en territorio español y bajo la normativa ASME BTH-2014 Design of Below-the-Hook Lifting Devices [5], para que pudieran también ser usados en territorio canadiense. También se emplearon verificaciones analíticas a diversos elementos en función del AISC Steel Construction Manual [6], así como modelos de elementos finitos.

Se diseñaron más de seis tipos distintos de cáncamos, todos atornillados y reutilizables.

Se realizaron maniobras con tiro directo al cáncamo mediante una sola grúa para algunos elementos del tablero y los arranques de pila (butts).



Figura 13. Tiro directo con cables.

Fue necesario el diseño de pescantes (fishplates) para la elevación de los módulos del tablero, que por sus dimensiones y peso precisaban de dos grúas para el izado. (Figuras 14 a 16).



Figura 14. Pescante fabricado para las maniobras.

En las maniobras es preciso tener en cuenta que en la realidad las dos grúas no levantan a la vez, por lo que, en función de cómo estuviera apoyada la pieza, pueden sobrecargarse las cogidas, en comparación con el momento en que ya han izado las dos grúas, esto es, hay que analizar no sólo el caso de que las cargas están repartidas entre las dos grúas, sino entre una grúa y los apoyos y entre la otra grúa y los apoyos, para ver qué situación es la dimensionante. Además, si las piezas se inclinan durante el izado, las distancias al centro de gravedad de las piezas varían, así como los ángulos de tiro, por lo que los esfuerzos en los elementos cambian por ese motivo, lo que hay que tener en cuenta en las

tolerancias a definir. Se definió una tolerancia de 5°.



Figura 15. Uso de pescantes con dos grúas. Tiro vertical.

Para el éxito de las maniobras fue crucial la buena coordinación entre los gruistas y las instrucciones del capitán, coordinando las operaciones de lastrado del buque con las variaciones de momento flector en las grúas.

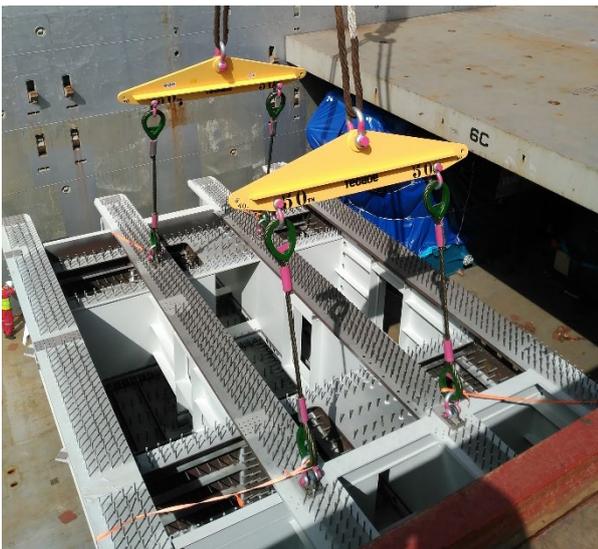


Figura 16. Empleo de pescante y una grúa. Tiro inclinado. Nótese los cáncamos atornillados.

Las maniobras de carga de los cabeceros (pier caps) fueron sin duda las más exigentes a

nivel de ingeniería. Se realizaron simulaciones por ordenador de forma previa para verificar la validez de los diseños predimensionados.



Figura 17. Modelización de las maniobras por ordenador.

Por un lado, sus dimensiones considerables y pesos de hasta 220 t, con unas posiciones de cogida de los elementos auxiliares muy estrictas, todas las posibles combinaciones de 4 posiciones diferentes de cogida por el lado largo (visto en planta) y 2 por el corto, variaciones de la posición del centro de gravedad con respecto a los puntos de cogida, y posición relativa variable entre las cogidas del lado largo y del corto, obligaron a crear un software para la obtención de la geometría del arnés de cogida (lifting harness), las cargas solicitantes de los elementos auxiliares y la verificación de dichos elementos. Se diseñaron 3 separadores de cables (spreaders) para permitir la elevación de los cabeceros (pier caps). Dicho sistema de diseño de los elementos, permite, para todas las posiciones, tener en cuenta las tolerancias de ejecución, los posibles excesos de laminación de las placas que hacen que la ubicación del centro de gravedad no coincida perfectamente con el teórico, más las inclinaciones previstas por falta de coordinación de grúas, corrigiendo la longitud de las eslingas gracias al empleo de varios grilletes de capacidad suficiente y distintos tamaños. Además, fue necesario tener en cuenta que la maniobra se realizó con una o dos grúas y que además éstas cogían la pieza del lado largo (con 2 cogidas en ese lado) o del corto (ídem) o de una combinación de ambos (cada grúa coge de un punto en el lado largo y otro en el lado corto). Otra restricción era que no se permitía a

abrir nuevos taladros ni aumentar el diámetro de estos, por lo que era preciso contar con esa restricción de capacidad de tiro máxima, lo que obligó a realizar vigas de cogida en lugar de simples cáncamos. (Figuras 18 y 19).

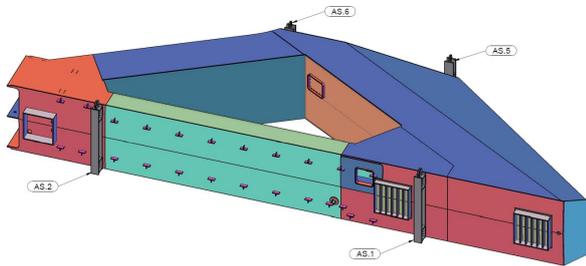


Figura 18. Vigas de cogida del lado largo para un cabecero, en gris. En el lado corto pueden verse también.



Figura 19. Maniobra de carga de cabecero con 2 grúas con vigas de cogida. En primer plano eslingas de acero, en verde eslingas de kevlar.

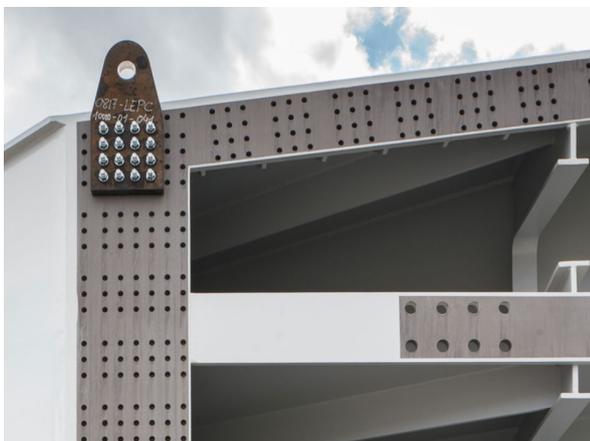


Figura 20. Cáncamo atornillado en la zona corta de contacto del cabecero con el arranque (butt).

Se tuvo en cuenta también la actuación de eslingas de kevlar (verdes en las fotografías) y de acero, de forma separada o conjunta, dado su diferente comportamiento, así como las diferentes longitudes disponibles de éstas, que requerían una geometría diferente, en cada izado, de la pirámide formada por las cuatro eslingas.



Figura 21. Maniobra con separador de cables en lado largo y tiro directo a cáncamo en lado corto. Empleo de un SPMT diferente.



Figura 22. Unos de los separadores de cables diseñados, con 4 posiciones distintas de uso, de 15 m de largo.

Para prescindir de grúas auxiliares para realizar la conexión de los separadores a los cabeceros en la opción de una sola grúa, se diseñaron unos brazos de posicionamiento que

mantenían la forma relativa entre los separadores de cables del lado corto y lado largo. Debe tenerse en cuenta que el arnés de elevación pesaba más de 17 t. Cuando se realizan este tipo de elementos de separación, suelen ser muy robustos, dado que entran en compresión, procedente de los tiros de las eslingas. Los brazos se diseñaron de manera que para las cargas de peso propio mantenían la forma del conjunto para permitir el enganche de forma manual sin precisar grúas auxiliares ni dañar la pintura de los elementos. Toda vez que ya estaban conectados al cabecero y comenzaba la maniobra, entraban en juego las holguras con las que se había diseñado, de forma que quedaban colgados de los separadores (de forma contraria a como trabajan las estructuras tensegríticas, es decir, su efecto desaparece cuando el sistema entra en carga). Al descargar la pieza en el barco, al destensar las eslingas, volvían a entrar en juego los brazos, fijando de nuevo la posición relativa, sin dañar la pintura de los elementos. Los brazos permitían el empleo de todas las configuraciones posibles de posiciones distintas de enganche, tanto de los cabeceros del oeste como del este, dada la simetría de ambos. Su peso reducido hizo que pudieran ser montados a mano por varios operarios, teniendo un ensamblaje muy rápido con pasadores y galletas y ocupaba muy poco espacio en la bodega del barco para el transporte. (Figuras 23 a 27).

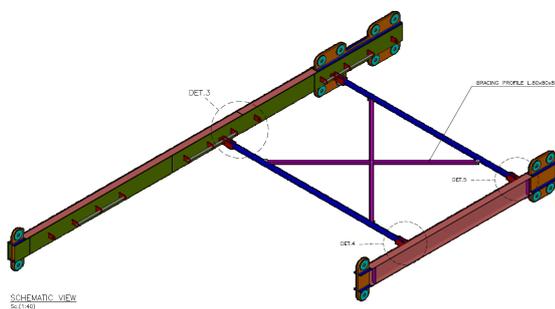


Figura 23. Brazos de separación unidos a los separadores de cables.

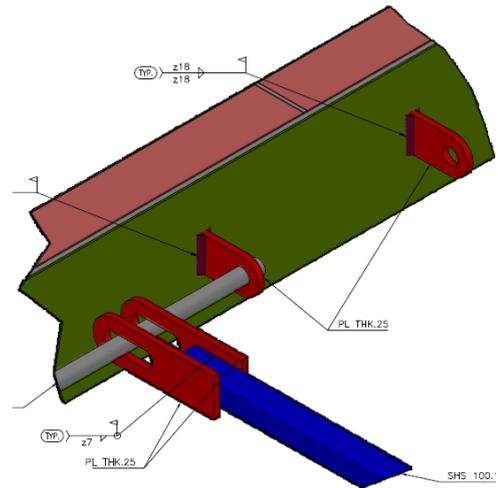


Figura 24. Detalle de la conexión.

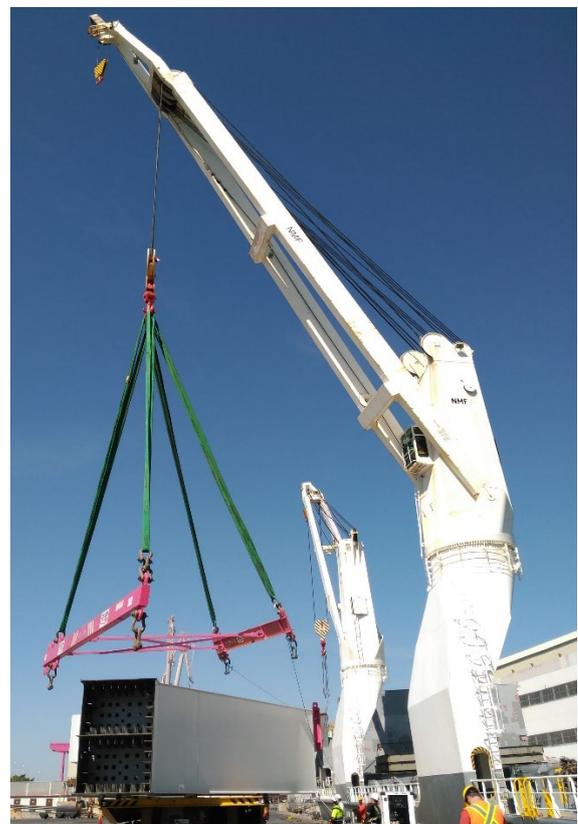


Figura 25. Separadores de cables con los brazos de posicionamiento antes de la instalación.



Figura 26. Dos separadores de cables desarrollados para la elevación con una o dos grúas, con los brazos de posicionamiento.

Todas las uniones atornilladas empleaban tornillos ordinarios, sin pretensado, con secuencia de apriete definida en proyecto y tuerca y contratuerca para evitar pérdidas de apriete.



Figura 27. Las longitudes necesarias de las eslingas se consiguieron empleando grilletes extra.

7. Verificación de elementos durante las maniobras de carga y transporte

Para verificar la validez de los elementos definitivos, los segmentos del puente, se realizaron modelos de elementos finitos tipo

placa de los elementos más representativos de cada tipología. Se simularon tanto las condiciones de transporte terrestre y marítimo, como los izados, para verificar que las tensiones en los elementos permanentes se mantenían dentro de los límites establecidos y que no se produjeran deformaciones permanentes en los mismos. Para ello, se estableció la limitación conservadora de exigir que no aparecieran tensiones en los elementos permanentes por encima del 60% del límite elástico del acero de las chapas.

7.1 Verificaciones durante el izado

Se realiza el modelo del elemento, considerando los espesores de chapa reales, teniendo en cuenta las condiciones de soldeo entre chapas, de cara a la vinculación entre los distintos elementos. Se modelizan los elementos principales, con los marcos de arriostramiento, rigidizadores longitudinales y locales, etc.

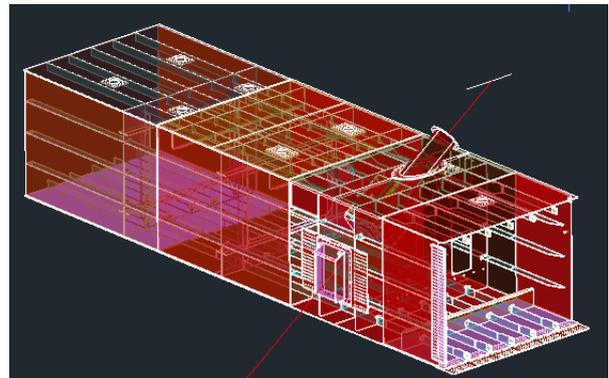


Figura 28. Modelo 3D de una Cross Beam.

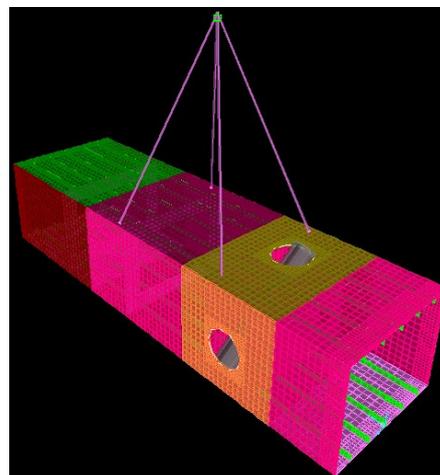


Figura 29. Modelo de elementos finitos desarrollado para la carga con una sola grúa de la Cross Beam.

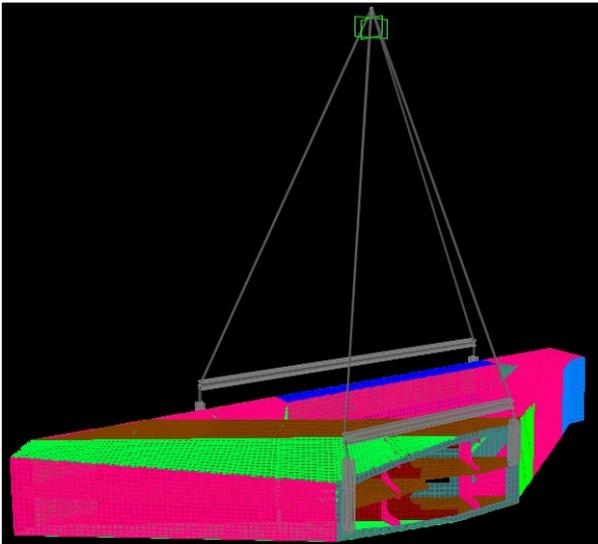


Figura 30. Modelo de elementos finitos de un cabecero en carga con una grúa y dos separadores de cables, con vigas de izado.

Se modelizan los elementos auxiliares, así como las eslingas, considerando la ubicación del centro de gravedad, para conseguir la distribución de cargas entre ellas, que se calcula también con métodos analíticos.

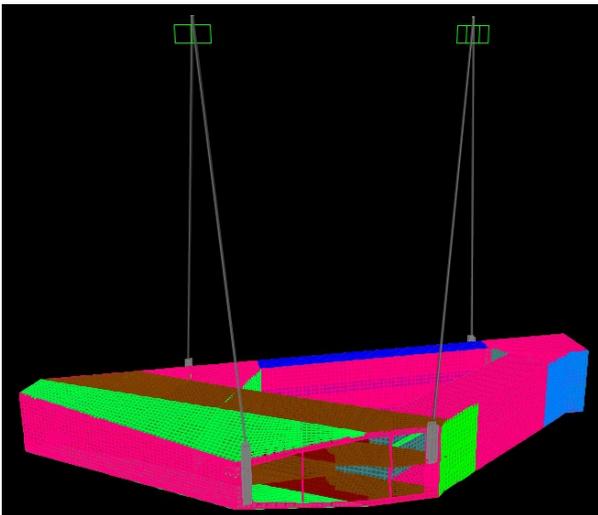


Figura 31. Situación de carga de un cabecero con dos grúas y tiro directo con vigas de izado.

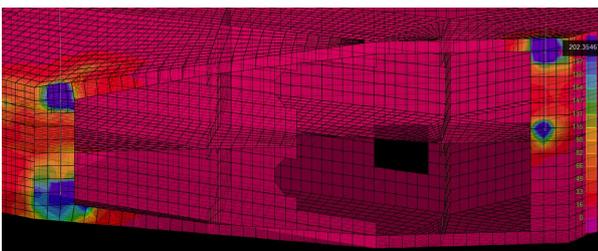


Figura 32. Tensiones de Von Mises en el izado en la zona de conexión con el arranque (Butt).

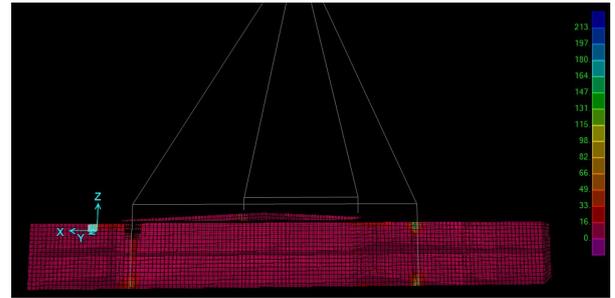


Figura 33. Tensiones de Von Mises en el lado largo del cabecero.

Las tensiones en los Butts, que se fabricaban boca abajo y se transportaban de la misma manera también se analizaron.

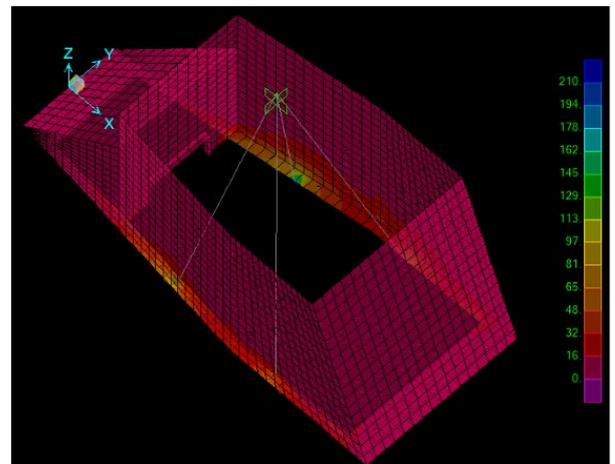


Figura 34. Tensiones en los arranques de pila durante el izado con una sola grúa y tiro directo.

7.2 Verificaciones durante el transporte terrestre

Debido a las aceleraciones verticales y horizontales que se producen durante el transporte, fue necesaria la comprobación tensodeformacional de los elementos fabricados, considerando las condiciones de apoyo, que son distintas a las empleadas en el tránsito marítimo, con mayores aceleraciones que por carretera.

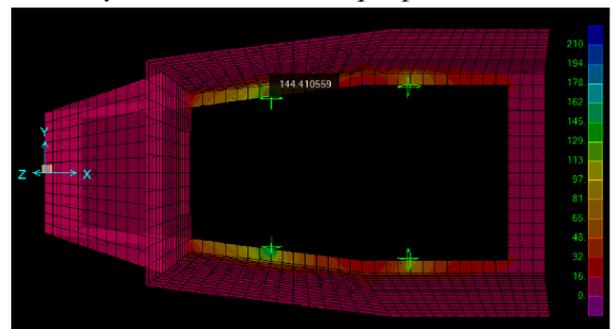


Figura 35. Tensiones durante el transporte por carretera en la parte inferior de un arranque de pila.

7.3 Verificaciones durante el transporte marítimo

Como ya se ha dicho, los elementos son asegurados al barco mediante diversos elementos para evitar movimientos no deseados. Es preciso analizar que dichos trincajes no producen deformaciones permanentes en los elementos a transportar.

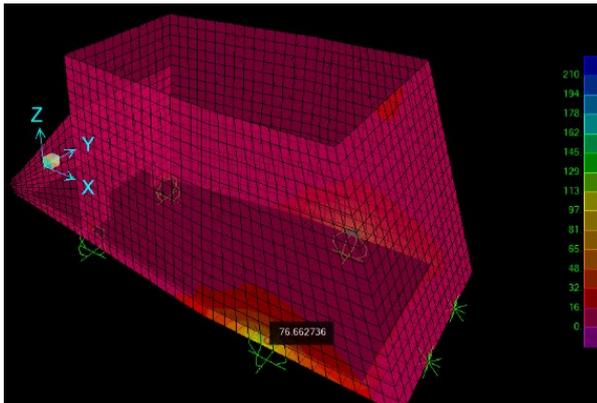


Figura 36. Tensiones durante el transporte en barco debidas a las aceleraciones longitudinales en un arranque de pila.

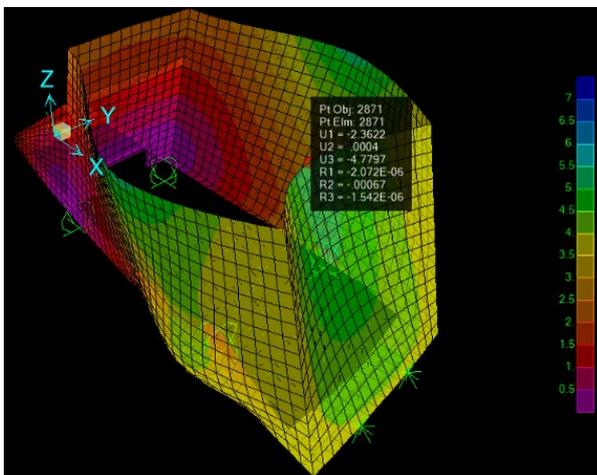


Figura 37. Deformaciones en un arranque de pila por aceleraciones longitudinales.

Se analizan también las resultantes en los apoyos, disponiendo eslingas en caso de que aparezca vuelco de los elementos, lo que se calcula también de forma analítica con el software generado para la verificación del plan de trincaje.

8. Conclusiones

A tenor de lo expuesto anteriormente, se puede colegir lo siguiente:

- Las últimas tendencias para la construcción acelerada de estructuras son la maximización de tamaño y peso.
- La globalización conlleva centros de producción muy alejados de los centros de consumo.
- La prefabricación de puentes metálicos precisa de planes de fabricación, carga, transporte, descarga y colocación en su posición definitiva teniendo en cuenta todos los condicionantes.
- Los condicionantes son amplios y dependen de cada caso concreto. En este texto se citan solo algunos de los tenidos en cuenta en los múltiples casos abordados para este proyecto.
- Debe analizarse el izado, el transporte terrestre y el marítimo. Las aceleraciones son más altas en el marítimo, pero posee más espacio y posibilidades de apoyo y trincaje que el terrestre.
- La dificultad para elegir el sistema de trincaje radica en cumplir todas las condiciones de contorno para el diseño, así como que sea válido para todas las posibles configuraciones que se dieron en el proyecto.
- Es posible diseñar elementos de arriostamiento que funcionan para las cargas de peso propio, durante la instalación y una vez el sistema entra en carga, se desactivan, sin entrar en carga, volviendo a entrar en carga cuando el sistema global se descarga, de forma contraria a como funciona una estructura tensegrítica.

Referencias

- [1] www.newchamplain.ca
- [2] Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing.

- [3] International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS).
- [4] UNE EN 1993. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero
- [5] ASME BTH-2014 Design of Below-the-Hook Lifting Devices.
- [6] AISC Steel Construction Manual, 15th Ed.